

INŻYNIERIA & BUDOWNICTWO

Grodzice

Ekonomiczne, optymalne, nowoczesne



ArcelorMittal

Głębokowodny Terminal Kontenerowy, Gdańsk
12 000 ton stali, 800 m ściany kombinowanej HZ-AZ, gatunek stali A690



Lider w produkcji grodzic oferuje kompleksowe rozwiązania geotechniczne dla portów, ścian oporowych, przyczółków mostów, parkingów podziemnych, ochrony przeciwpowodziowej i obudów wykopów.

Bezpłatne doradztwo techniczne świadczone przez zespół doświadczonych inżynierów.

Produkcja grodzic w Polsce i Luksemburgu.

Biuro regionalne:

ArcelorMittal Commercial Long Polska

ul. Uniwersytecka 13
40-007 Katowice

☎ +48 32 603 06 06

☎ +48 32 603 06 00

✉ ewa.sakwerda@arcelormittal.com

www.grodzice.pl

ArcelorMittal

Sheet Piling

Arcelor Commercial RPS S.à r.l.

66, rue de Luxembourg
L-4221 Esch/Alzette
Luxembourg

☎ +352 53 13 31 05

☎ +352 53 13 32 90

✉ sheet-piling@arcelormittal.com

www.arcelor.com/sheetpiling

transforming tomorrow

OPS (Organic Prestressing System) – nowa technologia w budownictwie mostowym

Przykłady nadzwyczajnej wydajności obecne w naturze mogą pomóc inżynierom w opracowaniu nowych rozwiązań, zwłaszcza obecnie, gdy rozwój techniki pozwala na użycie zaawansowanych metod. Pod koniec ubiegłego dziesięciolecia zrodziły się nowe pomysły dotyczące aktywnego sterowania konstrukcją, występujące pod nazwą „sprężenia organicznego” [1] i „parastressing” [2]. W obydwu przypadkach mają zastosowanie aktywne systemy sterowania [3], w których napęd nie jest zewnętrznym elementem wspomagającym, lecz składnikiem samej struktury. Podobny kierunek badań obrały już 40 lat temu firmy Freyssinet i Zetlin [4].

W świecie biostruktur istnieje ogromna różnorodność rozwiązań strukturalnych. Aż do dziś nie udało się inżynierii stworzyć elementu struktury, który pełniłby w niej rolę mięśnia, jak w strukturze biologicznej. Istnieją jedynie pewne właściwości systemów aktywnej kontroli, które mogłyby przypominać działanie mięśni, jednak wciąż nie są częścią samej struktury jak mięśnie (rys. 1).

Mięsień charakteryzuje się zmienną sztywnością, a zmiany te regulowane są przez dostarczenie energii. Dlatego też mięsień lub system efektora mogą być postrzegane jako element struktury, który zostaje usztywniony w wyniku działania energii, z możliwością regulacji siły struktury i ulepszając jakość wykonania, szczególnie w przypadku konkretnych zadań [4].

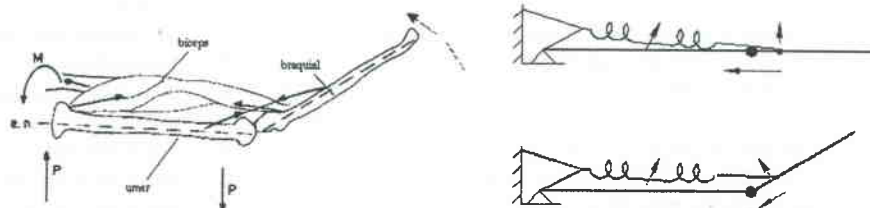
Za przykład systemu efektora może posłużyć organiczny system sprężenia. OPS daje optymalne sprężenie, co wiąże się z uniknięciem niepożądanego trwałego naprężenia, jak i znacznym zmniejszeniem strat sprężenia zależnych od czasu. Co więcej OPS pozwala na projektowanie lżejszych i bardziej smukłych struktur z tych samych materiałów konstrukcyjnych. Te rozwiązania konstrukcyjne są istotne zwłaszcza w sytuacji wysokiego stosunku „obciążenie zmienne/obciążenie stałe” [4].

Na rysunku 2 zilustrowano zastosowanie sprężenia organicznego (nie tylko

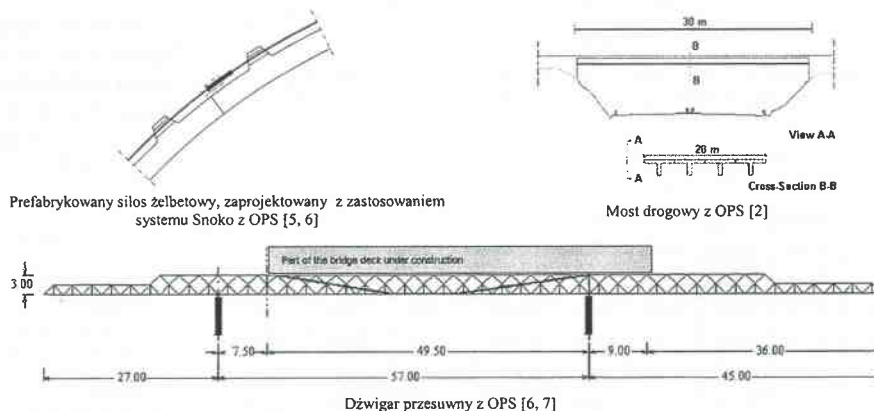
w inżynierii mostowej). Technologia budowy mostu przy zastosowaniu deskowania w postaci przesuwnej dźwigara została uznana za początkowy obszar zastosowania.

Zastosowanie układu sterowania w dźwigarze obejmuje połączenie elementów pokazanych na rys. 3.

Skutki zastosowania systemu OPS są łatwe do zidentyfikowania (rys. 4). Jeśli



Rys. 1. System mięśniowy [4]

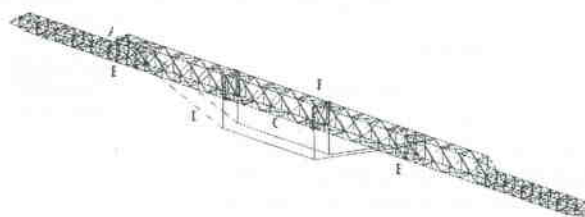


Rys. 2. Zastosowanie sprężenia organicznego [4]

Koncepcja technologii budowy mostu z zastosowaniem deskowania w postaci dźwigara przesuwnej

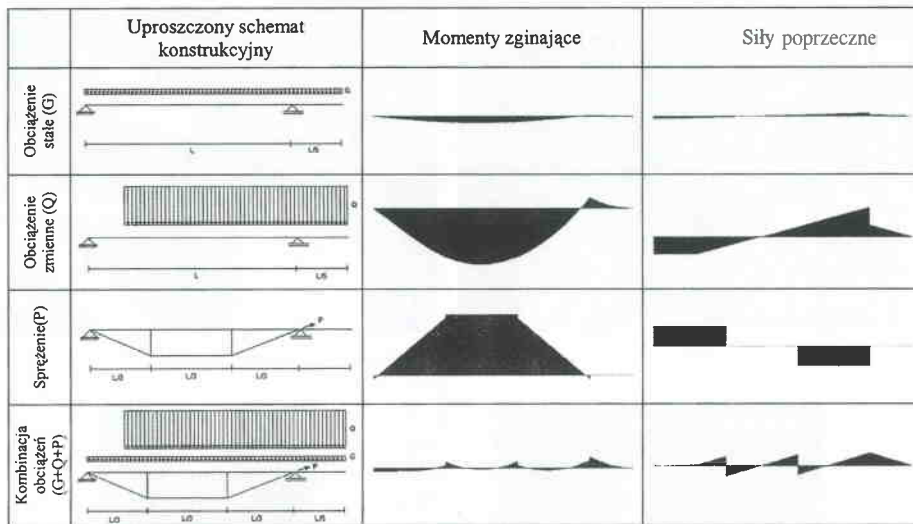
OPS jest systemem sprężenia, w którym naprężenie jest automatycznie dopasowywane przez układ sterowania do obciążenia wzbudzającego, w celu zredukowania odkształceń strukturalnych oraz zminimalizowania naprężeń.

sprężenie (P) jest zastosowane jednocześnie z obciążeniem użytkowym ($G + Q$), dźwigar z głównym przęsłem o długości L zachowuje się podobnie do trójprzęstowej belki ciągłej z przęsłami o długości $L/3$. Strzałka ugięcia i momenty zginające są znacznie zredukowane. Jeśli tradycyjne sprężenie (P) zostałoby zastosowane do nieobciążonej



- A – Siłownik i układ sterujący zasilaniem
- B – Zakotwienie organiczne
- C – Czujniki
- D – Kable zewnętrzne
- E – Zakotwienie bierne
- F – Konstrukcja

Rys. 3. Trójwymiarowy schemat konstrukcji z systemem OPS



Rys. 4. Jakościowe ujęcie głównych strukturalnych efektów OPS

konstrukcji, spowodowałyby niepożądane skutki – wpływ sprężenia byłby równie niekorzystny w odniesieniu do konstrukcji, jak wpływ obciążenia zmiennego (Q).

Numeryczna i eksperymentalna analiza możliwości zastosowania OPS na placu budowy

Przeprowadzone obliczenia pokazują, że dzięki technologii OPS można zredukować straty sprężenia i dobrze znane niekorzystne efekty tradycyjnego sprężenia [2, 6, 8].

Koncepcja modelu konstrukcji powstała w 2002 roku na Wydziale Inżynierii Uniwersytetu w Porto. Głównymi celami było oszacowanie możliwości zastosowania technologii OPS oraz potwierdzenie poprawności wyników z przeprowadzonych wcześniej obliczeń.

Model w skali zmniejszonej jest stężonym kratowo stalowym dźwigarem skrzynkowym, którego podpory zakończone stalowymi końcówkami przymocowano do płyty laboratoryjnej (rys. 5).

Całkowita długość (L) modelu wynosi 14 m, na którą składa się swobodnie podparte przęsło o długości $4L/5$ i przęsło wspornikowe długości $L/5$. Betonowanie płyty mostu symulowano przez powolne napełnianie wodą skrzynek usytuowanych wzdłuż modelu. Powolne zwiększanie obciążenia pozwala OPS być układem sterowanym w sposób statyczny.

Wyniki eksperymentu potwierdziły poprawność uzyskanych wcześniej wyników obliczeń i pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków dotyczących zastosowania systemu OPS w konstrukcji przesuwnej dźwigara:

- system OPS zapewnia znaczne zwiększenie nośności dźwigara,
- system OPS gwarantuje znaczne zmniejszenie strzałki ugięcia dźwigara.

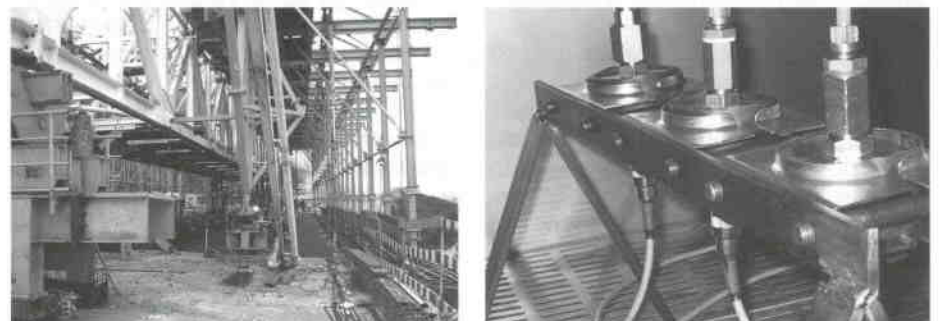
W 2004 roku system pomiaru ugięć został przetestowany w rzeczywistych warunkach budowy i potwierdził możliwość praktycznego zastosowania technologii OPS (rys. 6).

Pierwsze zastosowanie konstrukcji naturalnej wielkości

W 2005 roku pierwsze prototypowe urządzenie naturalnej wielkości zostało



Rys. 5. Model z symulatorem ładunku („skrzynki” mają być napełnione wodą) [8]



Rys. 6. Konstrukcja dźwigara przesuwnej „Sao Brás” (z lewej); czujniki pomiaru ugięć (z prawej)



Rys. 7. Konstrukcja dźwigara przesuwnej Rio Sousa

zastosowane w procesie budowy 30-metrowego przęsła obiektu mostowego, realizowanego w północnej Portugalii.

Konstrukcja systemu dźwigarów przesuwnej „Rio Sousa” jest podwieszonym ruchomym systemem rusztowań, który składa się z czterech niezależnych stalowych dźwigarów przesuwnej, wsporników, pierścieni ciernych oraz zestawów wózków. Dźwigary są „uzbrojone” w osprzęt OPS, który składa się z zewnętrznych (bezprzyczepnościowych) kabli sprężających, zakotwień, elementów konstrukcji dewiatorów, siłowników hydraulicznych, czujników oraz elementów automatyki (rys. 7).

Konstrukcje przesuwne to modułowe, stężone kratowo stalowe dźwigary skrzynkowe o całkowitej długości przęsła równej 64 m, z których 40 m to konstrukcja główna, natomiast pozostałe 2×12 m przekształca się w awanbeki. Przekrój poprzeczny dźwigara ($1,25 \times 2,00$ m) został zaprojektowany z uwzględnieniem dostosowania do warunków budowy oraz ułatwienia transportu.

W każdym dźwigarze zainstalowano zewnętrzne kable sprężające, usytuowane w płaszczyznach pionowych. Każdy kabel, zakotwiony obok sekcji podporowych i wygięty przez dwa dewiatory

umiejscowione w 1/3 długości przęsła, jest utworzony z wiązki 12 pojedynczych cięgien.

Końcowy, czynny element „systemu organicznego” to belka, która pozwala, za pomocą jednego podnośnika hydraulicznego, naciągnąć jednocześnie dwa zespoły cięgien (rys. 8 – z lewej). Zakotwienie pojedynczych cięgien stanowią głowice kotwiące, które przenoszą docisk końcowych odcinków pojedynczych cięgien. Zakończeniem biernym systemu jest także stalowa belka, przymocowana do konstrukcji (rys. 8 – z prawej).

Podpory dewiatorowe są elementami o prostokątnym skrzyńkowym przekroju poprzecznym, które odchylają kable sprężone i przenoszą składowe siły powstałe na skutek odgięcia kabli na konstrukcję stalową (rys. 9 – z lewej). Siodła dewiatorowe są elementami umieszczonymi w dolnej części podpór dewiatorowych, odginającymi kable sprężone bez uszkodzania osłonek cięgien (rys. 9 – z prawej).

Siłowniki (podnośniki hydrauliczne) są podobne do tych, których używa się w innych obszarach inżynierii wodnej i lądowej. Z przyczyn bezpieczeństwa, skok ich tłoka jest fizycznie ograniczony przez zawory ciśnieniowe oraz dzięki oprogramowaniu sterującemu, powodującemu blokadę OPS. Jeśli zepsuje się siłownik podczas etapu obciążania, dwie duże śruby i odpowiednie nakrętki fizycznie utrzymują belkę kotwiącą, zapobiegając zmniejszeniu naprężenia w kablach sprężających.

Ugięcie przęsła środkowego jest mierzone przez czujniki ciśnienia. Zmiana ugięcia dźwigara może być określona przez zmiany w ciśnieniu hydrostatycznym.

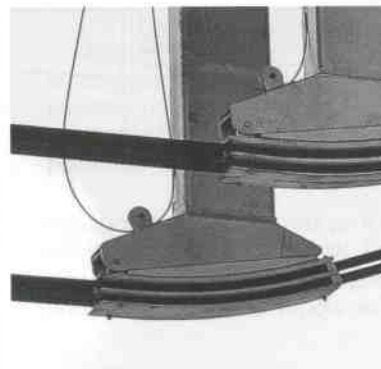
Oprogramowanie sterujące jest obsługiwane komputerem wykorzystującym komendy interfejsowe, którymi operator wybiera żądany tryb operacji, odpowiednio do etapu budowy. Operator jest stale informowany o stanie systemu za pomocą ekranu dotykowego, na którym oprócz innych wartości wyświetlane są ugięcia każdego dźwigara, ostrzeżenia i alarmy.

Ograniczenia funkcjonalne dźwigara przesuwanego są następujące (podano wartości maksymalne):

- rozpiętość pomiędzy filarami 30 m,
- ciężar płyty (świeży beton – 26 kN/m³) 247 kN/m,
- ciężar deskowania 15 kN/m,
- mimośród deskowania (etap przesuwania) 0,10 m,
- prędkość wiatru (etap przesuwania) 40 km/h,
- prędkość wiatru podczas betono-



Rys. 8. Siłownik i zakotwienie (po lewej); zakotwienie bierne (po prawej)



Rys. 9. Podpory dewiatorowe (po lewej); siodła dewiatorowe (po prawej)

wania płyty (ograniczenie konstrukcyjne) 100 km/h,

- prędkość wiatru przy poprzecznie zamontowanym dźwigarze (bez obciążenia) 190 km/h,
- promień krzywizny w planie 1000 m,
- spadek podłużny 2%,
- odkształcenie w czasie betonowania płyty (przęsło środkowe) 2,5 mm.

Korzyści wynikające z zastosowania systemu OPS

Wyznając politykę innowacji, konstruktor był ściśle związany z obecnym projektem naukowo-badawczym jeszcze w jego stadium eksperymentalnym. W okresie przejściowym pomiędzy etapami eksperymentalnym i wdrożeniowym, aby zapewnić możliwe do przeprowadzenia i funkcjonalne rozwiązania, skorzystano z pomocy doświadczonych technologów. Poza korzyściami finansowymi, w trakcie pierwszego zastosowania konstrukcji OPS w dźwigarze przesuwnym o naturalnej wielkości pojawiły się również inne, takie jak:

- zakończone powodzeniem zastosowanie systemu OPS do budowy 23 przęseł płytowych,
- dzięki zastosowaniu efektywnej kontroli odkształceń systemu OPS osiągnięto wysoki poziom jakości wykonawstwa,
- nie odnotowano żadnych problemów technicznych,
- po 4 pierwszych tygodniach prac wykonawca przejął kierownictwo nad sterowaniem systemem OPS;

- wykonanie płyty trwało krócej o 22 dni niż zaplanowano.

Nowe zastosowania

Badania prowadzone nad systemem OPS wciąż jeszcze są w stadium początkowym i rozważa się nowe możliwości zastosowania systemu. Wstępne wyniki niektórych z tych badań są bardzo obiecujące. Dalej omówiono dwa możliwe zastosowania systemu OPS.

• **Wzmocnienie istniejących konstrukcji przesuwanych.** Płyty mostów szybkiej kolei (High Speed Railway Bridges) różnią się znacznie zarówno od płyt zwykłych mostów kolejowych, jak i mostów autostradowych. Te pierwsze są cięższe (od 25 do 30%), ponieważ wartości obciążenia zmiennego są większe, a tym samym wymagania dotyczące ugięć są bardziej rygorystyczne. Większość portugalskich urządzeń do wykonywania konstrukcji betonowanych na placu budowy (przy średniej długości przęsła – od 30 do 50 m) wymaga dodatkowego wzmocnienia w celu zastosowania do wykonania płyt HSRB [9].

Konstrukcja nasuwająca przedstawiona na rys. 6 (po lewej) to rusztowanie podwieszone, które było już wielokrotnie i z powodzeniem stosowane przy budowie płyt mostów autostradowych.

Na rysunkach 10, 11 i 12 porównano trzy różne modele dźwigarów przesuwnych „Sao Bras”, poddanych następującemu oddziaływaniu:

- ciężarem płyty mostu autostradowego – HB,
- ciężarem płyty HSRB – HSRB,
- ciężarem płyty HSRB – HSRB (konstrukcja dźwigara wzmocniona OPS).

Uproszczona analiza wyników numerycznych pokazuje, że w przypadku wzmocnienia konstrukcji przesuwnej „Sao Bras” do wykonania płyty HSRB o takim samym przęśle należałoby zwiększyć ilość stali o 25 ÷ 30%.

Przy użyciu OPS są potrzebne jedynie miejscowe wzmocnienia, a koszt systemu OPS wynosi nie więcej niż 10% kosztu pierwotnej wersji konstrukcji dźwigara przesuwnego. Co więcej, większość sprzętu systemu OPS może być wykorzystywana powtórnie, w połączeniu z innymi konstrukcjami dźwigarów przesuwnych.

• **Konstrukcje płyt mostów o dużych przęsłach.** Jedną z najbardziej atrakcyjnych perspektyw związanych z zastosowaniem systemu OPS jest opracowanie standardowej konstrukcji z OPS, mającej zastosowanie do budowy mostów o długości przęsła 75 ÷ 85 m. Płyty mostów o takiej rozpiętości przęsła są zwykle budowane tradycyjną metodą wspornikową (rzeczywiście, nie są jeszcze znane konstrukcje dźwigarów przesuwnych do takiego rodzaju przęseł).

Jak pokazują wyniki początkowych badań techniczno-ekonomicznych, zalety tego szczególnego zastosowania OPS wykraczają poza wynikające z porównania sprzętu, mając wpływ na cały proces budowlany, prowadząc do znacznie szerszych korzyści.

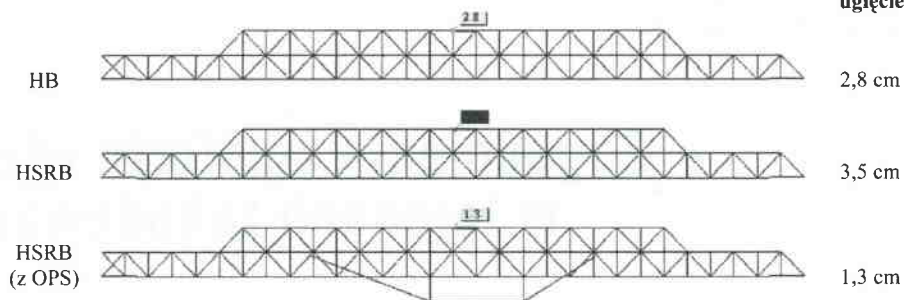
Podsumowanie

OPS jest nową technologią, która ma wiele zastosowań w inżynierii budowlanej, w szczególności w inżynierii mostowej. Pierwsze zastosowanie urządzenia o naturalnej wielkości potwierdziło, że system ten jest prosty i możliwy do zrealizowania. Dodatkowo, potwierdziły się również następujące zalety:

- lżejsze i bardziej funkcjonalne dźwigary (do 30% redukcji ilości stali),
- gwarancja kontroli geometrii – znaczna redukcja ugięć,
- zapewniona większa nośność sprzętu,
- prostsze połączenia elementów stalowych (znaczna redukcja naprężeń).

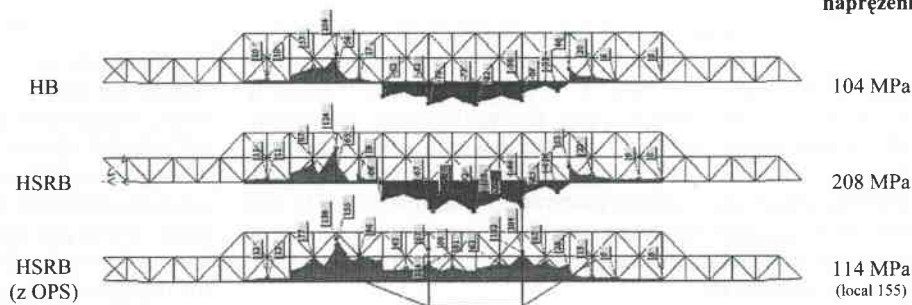
Nowe zastosowania OPS mają być dokładnie zbadane w celu stwierdzenia największych korzyści płynących z tego rozwiązania, zarówno w przypadku wzmocnienia istniejących konstrukcji OPS, jak i budowania sprzętu OPS do płyt mostów o dużej rozpiętości przęseł.

Maksymalne ugięcie



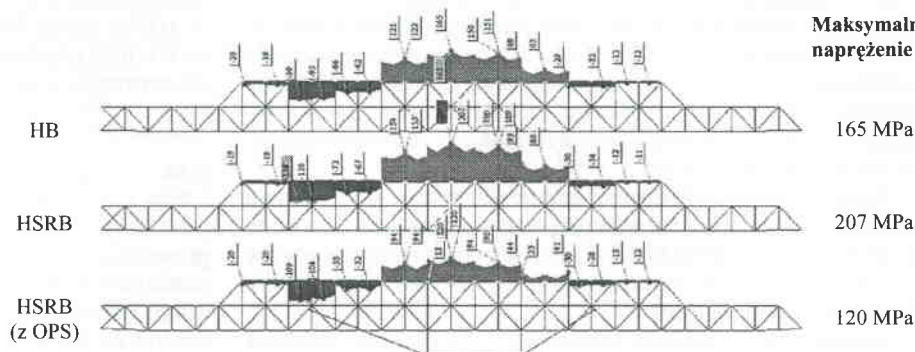
Rys. 10. Ugięcia modeli dźwigarów przesuwnych [9]

Maksymalne naprężenie



Rys. 11. Naprężenia w kształtownikach pasów dolnych [9]

Maksymalne naprężenie



Rys. 12. Naprężenia w kształtownikach pasów górnych [9]

Podziękowania

Autorzy artykułu składają podziękowania pani inż. Teresie Oliveira oraz Panu inż. Antonio Andre za istotny wkład w prezentowane przedsięwzięcie oraz pomoc przy powstaniu tego artykułu.

PIŚMIENICTWO

- [1] Pacheco P., Adao da Fonseca A.: Effector systems in structures, Conceptual design of structures. Proceedings of IASS Symposium, Stuttgart 1996.
- [2] Montens S.: A Global Concept for 21st Century Bridges: Parastressing Proceedings, FIP Symposium on Post-Tensioned Concrete Structures, London 1996.
- [3] Soong T. T.: Active Structural Control: Theory and Practice. Longman Scientific & Technical, New York 1990.
- [4] Pacheco P.: Organic prestressing – an example of an effector system, in Structural Concrete, Journal of the fib, Vol. 3, Number 2, June 2002.
- [5] Knauff M., Sadowski A.: Prestressing of circular tanks with tendons connected on the cir-

cumference – Snoko System. FIP Symposium on Post-Tensioned Concrete Structures, London 1996.

- [6] Pacheco P.: Organic Prestressing – an effector system example (in Portuguese). PhD Thesis, Department Civil Engineering, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1999.
- [7] Pacheco P., Quinaz M. C., Adao da Fonseca A.: Applying Organic Prestressing on Launching Gantries (in Portuguese). Proc. 1st Encontro de Estruturas Metálicas e Mistas, Porto 1997.
- [8] Andre A. Pacheco P., Adao da Fonseca A.: Experimental study of a launching gantry reduced scale model. „Structural Engineering International”, Journal of IABSE, 2006, Vol. 16, N. 1.
- [9] Pacheco P. et al.: Strengthening by organic prestressing of existing launching gantries in the construction of high speed railway bridge decks, in proceedings of workshop „Bridges for high-speed railways”, Porto 2004.